

© Б.Ю. Собко¹, Є.І. Сальник¹¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ ВИБОРІ ГІРНИЧОТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ РОЗСИПІВ

B. Sobko¹, <https://orcid.org/0000-0001-9533-5126>Ye. Salnik¹ <https://orcid.org/0009-0000-7893-9147>¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

RESEARCH OF THE BEARING CAPACITY OF ROCKS WHEN CHOOSING MINING AND TRANSPORT EQUIPMENT FOR THE DEVELOPMENT OF OVERFLOWS

Мета. Розробка методики вибору гірничотранспортного обладнання для розробки обводнених родовищ розсипних титан – цирконієвих руд за критерієм несучої здатності гірських порід.

Методологія. При виконанні роботи застосовані статистичний, аналітичний, графоаналітичний методи досліджень.

Результати досліджень. Проведений аналіз застосування гірничотранспортних комплексів на обводнених родовищах титан-цирконієвих руд з великою потужністю розкривних порід та корисної копалини. Проведені дослідження несучої здатності обводнених гірських порід Мотронівської ділянки Малишевського титан-цирконієвого родовища розсипних руд. Визначено можливість застосування гірничотранспортного обладнання циклічної дії (крокуючих екскаваторів ЕШ 10/50 та гідравлічних екскаваторів САТ 6018 для розробки обводнених гірських порід на робочих горизонтах кар'єру. На основі виконаних досліджень, для умов кар'єру Мотронівського розсипу встановлено, що на горизонті + 100,0 м не допускається розташування гірничо-транспортного обладнання через низьку несучу спроможність пісків сарматського ярусу на даному горизонті. Допускається робота екскаватора ЕШ-10/50 на горизонтах +105,0 м та +110,0м. В той же час, не допускається робота екскаватора САТ 6018 без заміни ходового візка зі зменшеним питомим тиском екскаватора на ґрунт, при розробці пісків сарматського ярусу на горизонтах +105,0 м та +110,0 м; та використання автосамоскидів без укріплення основи дорожнього полотна на уступі пісків сарматського ярусу. Результати дослідження враховують особливості розробки м'яких гірських порід комплексами гірничотранспортного обладнання в умовах кар'єру Мотронівського ГЗК.

Наукова новизна. Запропоновано методичний підхід для визначення несучої здатності м'яких гірських порід в кар'єрі з врахуванням його обводнених горизонтів.

Практичне значення. Результати досліджень дозволяють визначати можливість застосування гірничотранспортного обладнання при розробці обводнених гірських порід на горизонтальних розсипних родовищах.

Ключові слова: гірська порода, несуча здатність гірських порід, родовище корисної копалини, система відкритої розробки родовища, гірничотранспортний комплекс, кар'єрна механічна лопата, екскаватор драглайн.

Вступ. Україна займає одне з передових місць за запасами розсипних титан-цирконієвих руд, які в наш час, відносяться до стратегічної мінеральної сировини. Найбільш потужним є Малишевське розсипне родовище, що розташоване в Кам'янському районі Дніпропетровської області. Родовище представлено м'якими гірськими породами у вигляді відкладень дрібно і тонкозернистих рудних пісків полтавської та сарматської серій. Піски полтавської серії на родовищі перекриваються дрібнозернистими кварцовими пісками сарматського ярусу, з якими пов'язано основне оруднення родовища. Потужність полтавських і сарматських пісків досить витримана і в середньому становить близько 20 м.

Сарматські піски перекриваються строкатими сарматськими глинами, четвертинними зеленувато-сірими і червоно-бурими глинами, червоно-бурими і палево-жовтими лісовидними суглинками. Потужність глини і суглинків коливається від декількох до 50 м, в залежності від рельєфу. Потужність продуктивних рудних пісків сарматського ярусу коливається від 2 до 20 м.

Протяжність покладів спостерігається до 19 км завдовжки і до 2,5 км завширшки. Ширина покладів кожної окремо від 200 м до 900 м, вони розділені між собою безрудними зонами шириною 100–300 м, складеними кварцовими пісками з вмістом важкої фракції 2–5 кг/м³.

Гірничотехнічні умови експлуатації родовища є сприятливими для відпрацювання відкритим способом покладів сарматського ярусу.

Рудні піски і породи розкрити за складністю екскавації відносяться до I–IV категорій, піддаються прямій екскавації, без попереднього розпушування [1, 2].

Однією з найважливіших характеристик гірських порід є їх несуча здатність. Простіше кажучи – це здатність тої чи іншої породи витримувати різні ступені навантаження при застосуванні різнотипного гірничотранспортного обладнання без руйнування при зсуві.

Несуча здатність гірських порід залежить від трьох факторів: тип породи, ступінь ущільненості і насиченість її вологою. Збільшення вологості породи знижує його несучу здатність в кілька разів [3].

Оскільки вибір обладнання для розробки родовищ корисних копалин є однією з важливих задач ще на стадії створення проектів розробки та експлуатації родовищ то завдання визначення несучої здатності гірських порід, особливо порід, що схильні до впливу ґрунтових вод, що є предметом дослідження в даній статті є важливим та актуальним завданням.

Основна частина. Попередні дослідження несучої здатності гірських порід стосувалися, здебільшого, питань вивчення стійкості гірських масивів, уступів та бортів кар'єрів [4–6].

Так автори роботи [4] запропонували комплексний підхід до визначення раціональних параметрів робочої зони з врахуванням факторів стійкості гірничого масиву та впливу гірничої техніки і технології ведення гірничих робіт в кар'єрі. Для цього в роботі було виконано оцінку стійкості робочого борту кар'єру та визначено значення коефіцієнта запасу стійкості для робочого борту з впливом обводненості гірничого масиву. Але в роботі автори не розглядають

вплив несучої здатності гірських порід на можливість застосування гірничотранспортного обладнання для умов розробки обводнених родовищ.

В роботі [5] викладені результати досліджень геомеханічних закономірностей стійкого стану укосів і бортів кар'єрів з урахуванням складної геологічної структури та гідрогеологічних особливостей гірських порід і їх навантаженням при застосуванні гірничотранспортного обладнання. При цьому, автори не проводять рекомендацій стосовно впливу гірських порід з малою несучою здатністю на застосування виймально-навантажувального та транспортного обладнання.

В даний час розроблено проект будівництва гірничо-збагачувального комплексу з видобутку та переробки титан-цирконієвої руди Мотронівсько-Аннівської ділянки Малишевського родовища. Згідно гірничо-геологічної частини проекту за літологічними параметрами були виділені шари гірських порід:

- 1-й – розкривний – родючий шар, висота уступу 0,2–1,1 м, у середньому – 0,6 м;

- 2-й та 3-й – розкривний – лесовидні суглинки, супіски і піски, висота уступів до 10,0 м, де потужність четвертинного розкриву перевищує 20,0 м, проводиться пониження екскаватором ЕШ-10/50;

- 4-й – розкривний – жовто-бурі суглинки, висота 4-го уступу видобутку – до 10,0 м;

- 5-й – червоно-бурі суглинки, висота уступу видобутку до 10,0 м;

- 6-й – розкривні – червоно-бурі глини, висота уступу до 10,0 м, 5-й і 6-й горизонти можуть розроблятися разом;

- 7-й – розкривний – кварцові піски нижнього сарматського ярусу і безрудні піски полтавського ярусу до 10,0 м;

- 8-й видобувний – рудні піски полтавського ярусу середня висота 11 м. В проекті розвитку гірничих робіт кар'єру було прийнято:

- розробка родючого шару здійснюється скрепером МоАЗ-Д357 з штовхачем САТ-D7R;

- розробка розкривних порід ведеться з використанням кар'єрних гідравлічних екскаваторів САТ6018, крокуючих екскаваторів ЕШ-10/50 з ємністю ківша 10 м³ і автосамоскидів САТ 773;

- на видобутку рудних пісків використовуються екскаватори ЕШ-10/50 з ємністю ківша до 10 м³ з транспортуванням руди автосамоскидами на вузол гідрозмиву і в подальшому розмиваються і гідротранспортом подаються на збагачувальну фабрику;

- частина сарматських пісків розробляється екскаваторами ЕШ-10/70 з ємністю ківша до 10 м³, за безтранспортною схемою;

- оформлення неробочих уступів по розкривних породах і виположування укосів відвалів виконується екскаватором-драглайном типу ЕШ-10/50 і бульдозерами.

При розробці горизонтів екскаватором ЕШ-10/50 передбачалась можливість одночасної розробки двох уступів за допомогою нижнього та верхнього черпання та можливістю встановлювати на цих горизонтах гірничотранспортне обладнання за умови несучої стійкості порід.

Проектом передбачалось влаштування робочого горизонту в пісках сарматського ярусу на відмітці +100,0 м з розміщенням на ньому гірничотранспортного обладнання: крокуючих екскаваторів ЕШ-10/50 та автосамоскидів САТ 773.

Проектним інститутом “ГІРХІМПРОМ” були проведені інженерно-геологічні роботи по визначенню фізико-механічних властивостей розкритих пісків сарматського ярусу на горизонтах кар’єру: +110,0 м; +105,0 м та +100,0 м. Одержані характеристики є вихідними даними для розрахунку несучої здатності пісків та визначення можливості роботи екскаваторів ЕШ-10/50 та САТ 6018 з застосуванням автотранспорту на цих горизонтах.

По гранулометричному складу, щільності сухого ґрунту, коефіцієнту пористості піски, які залягають на різних горизонтах не відрізняються між собою. Піски на горизонті +100 м залягають нижче рівня ґрунтових вод, тому вони мають більшу вологість і об’ємну вагу.

Аналіз характеристик властивостей пісків у відповідності із ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95) “Ґрунти. Класифікація” [7] показує:

- по гранулометричному складу вони відносяться до мілких (дрібних),
- за коефіцієнтом пористості відносяться до пісків середньої щільності,
- за коефіцієнтом водо насичення: відповідають піскам малого ступеню водонасичення (на горизонтах +110,0 м, +105,0 м) та насиченим водою (на горизонті +100,0 м).

За даними лабораторних досліджень, звертають на себе увагу великі значення питомого зчеплення, що не характерно для пісків. Пояснюється це двома причинами: а) наявністю цементації (формально це дуже пухкі пісковики), б) неокатаністю зерен кварцу. Останнє підтверджується результатами зсувних випробувань, проведених на пісках порушеної структури у водонасиченому стані. Величина питомого зчеплення перевищувала 15 кПа.

Результати зсувних досліджень зразків непорушеної структури показали, що піски на відмітках +105,0 м та +110,0 м мають практично однакові значення кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення. На відмітці +100,0 м значення цих характеристик менші. Це пояснюється наявністю ґрунтових вод, які руйнують цементацію. Підтвердженням цього є той факт, що значення характеристик міцності піску, відібраного на відмітці +100,5 м вище рівня води, більші ніж в пісках, залягаючих під водою.

Результати досліджень фізико-механічних властивостей пісків сарматського ярусу, залягаючих на горизонтах: +110,0 м, +105,0 м та +100,0 м, наведені в табл.

На основі інженерно-геологічних вишукувань за основу горизонту розміщення екскаваторів на відмітці +100,0 м прийнятий дрібний пісок з фізико-механічними характеристиками: $P_{II}=1,97\text{т/м}^3$; $\varphi_{II}=24^\circ$; $C_{II}=35\text{ кПа}$; $e=0,642$.

Згідно табл. В.1 ДБН В.2.1-10:2009 «Основи та фундаменти споруд» [8] для дрібних пісків при $e=0,645$ $E=28\text{ МПа}=2854\text{т/м}^2$, де E -модуль деформації.

Таблиця

Фізико-механічні властивості пісків сарматського ярусу

Індекс генезису і віку ґрунту	Назва ґрунтів (ДСТУ Б В.2.1.-2-96)	Природна вологість в д.о.	Щільність, т/м ³	Щільність твердих часток,	Щільність сухого ґрунту, т/м ³	Коефіцієнт пористості	Ступінь вологості	Кут внутрішнього тертя, градус	Питоме зчеплення, кПа	Розрахункові значення					
										Щільність, т/м ³		Кут внутрішнього тертя, градус		Питоме зчеплення, кПа	
		W	ρ	ρ	ρ	e	Sr	φ	C	ρ_{II}	ρ_I	φ_{II}	φ_I	C_{II}	C_I
N ₁	Пісок дрібний	Відмітка +110м													
		0,027	1,68	2,66	1,63	0,627	0,11	30	39	1,67	1,67	27	25	26	18
		Відмітка +105м													
		0,046	1,71	2,66	1,64	0,626	0,20	31	35	1,70	1,70	29	28	24	17
		Відмітка +100м													
		0,217	1,97	2,66	1,62	0,642	0,90	25	39	1,97	1,96	24	23	35	32

Розрахунковий опір ґрунту основи визначаємо за формулою:

$$R = \gamma c_1 \cdot \gamma c_2 / k [M\gamma k z b \gamma_{II} + Mq d_l \gamma_{II} + (Mq - l)d_b \gamma_{II} + Mc c_{II}] [7],$$

де: γc_1 і γc_2 – коефіцієнти умов роботи: $\gamma c_1 = 1,3$; $\gamma c_2 = 1$ (табл. Е.7 ДБН В.2.1-10:2009); $k = 1$, якщо міцнісні характеристики ґрунту (φ і c) визначені безпосередніми випробуваннями); $M\gamma = 0,72$; $Mq = 3,87$; $Mc = 6,45$ при $\varphi_{II} = 24^\circ$ – коефіцієнти, що залежать від кута внутрішнього тертя та приймають за табл. Е.7 та Е.8 ДБН В.2.1-10:2009 – $d_l = 0$, $d_b = 0$ – тому, що навантаження діє на поверхню ґрунту.

Друга і третя складова рівняння дорівнює 0.

Таким чином рівняння прийме вигляд:

$$\begin{aligned} R &= \gamma c_1 \cdot \gamma c_2 / k [M\gamma k z b \gamma_{II} + Mc c_{II}] = \\ &= 1,3 \cdot 1 / 1 [0,72 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 1,97 + 6,45 \cdot 3,5] = \\ &= 1,3 (0,85 + 22,58) = 30,46 \text{ т/м}^2 = 3,05 \text{ кг/см}^2. \end{aligned}$$

За розрахунками несуча здатність пісків сарматського ярусу в сухому стані на горизонті + 100,0 м становить 3,05 кг/см².

З врахуванням впливу води, що зважує частинки піску - кут внутрішнього тертя φ_{II} зменшується на 6–8 %, $\varphi_{II} = 0,92 \cdot 24^\circ = 22^\circ$; $\gamma_{II} = 1 \text{ кг/см}^2 = 10 \text{ т/м}^2$.

$R = 2,39 \text{ кг/см}^2$ – для насиченого водою піску.

При динамічних навантаженнях під час роботи екскаватора виникають коливання і зміщення піщаних часток, які приводять до накопичення зсувних деформацій. Цей рух супроводжується перепакуванням частинок породи і зміною пористості піщаного ґрунту.

Ущільнення водо насичених пісків відбувається по мірі витиску води з пор ґрунту. Руйнування структурних в'язей і ущільнення ґрунту приводить до повної або часткової передачі тиску від власної ваги ґрунту і зовнішнього навантаження на порову воду, що виражається в зростанні порового тиску і зниження ефективних напружень на контакті між піщинками. При відсутності відтоку води при досягненні повного відносного тиску зерна виявляються зваженими у воді і внаслідок малої водопроникності дрібних пісків спостерігається розрідження пісків.

Навантаження на гірські породи від гірничого обладнання розповсюджується на глибину до 5,0 м. Для попередження розповсюдження навантажень від гірничого обладнання в обводненій частині пісків, не рекомендується його розташовувати на горизонті + 100,0 м кар'єру Мотронівського ГЗК.

Розрахунковий опір ґрунту на горизонтах кар'єру: +105,0 м та 110 м визначаємо за тією ж формулою, що і на горизонті +100,0 м.

На горизонті + 105,0м прийнятий дрібний пісок з фізико- механічними характеристиками: $P_{II} = 1,70 \text{ т/м}^3$; $\varphi_{II} = 29^\circ$; $C_{II} = 24 \text{ кПа}$; $e = 0,626$. В свою чергу на горизонті +110,0 м прийнято також дрібний пісок з наступними фізико- механічними характеристиками: $P_{II} = 1,67 \text{ т/м}^3$; $\varphi_{II} = 27^\circ$; $C_{II} = 26 \text{ кПа}$; $e = 0,627$.

За розрахунками несуча здатність пісків сарматського ярусу в сухому стані на горизонтах +105,0 та +110,0 м не змінюється і становить $2,53 \text{ кг/см}^2$.

Проведені дослідження дозволяють проводити розрахунки несучою здатності гірських порід та рекомендувати застосування гірничотранспортного обладнання для роботи на різних горизонтах кар'єра зі складними гірничо-геологічними умовами залягання порід.

На рис. наведено параметри елементів системи розробки Мотронівського розсипу з розміщенням гірничотранспортного обладнання на кар'єрі, з врахуванням несучої здатності гірських порід на його горизонтах.

Для формування дорожнього полотна тимчасових кар'єрних автодоріг з місцевих гірських порід, що розробляються в кар'єрі, можна створювати покриття із сіро-зелених глин сарматського ярусу на горизонтах кар'єру і на відвалах.

Висновки.

Таким чином, враховуючи проведені розрахунки та обводненість пісків Сарматського ярусу горизонту кар'єру – +100,0 м, не рекомендується розташовувати на ньому гірниче обладнання.

Відомо, що середнє питоме навантаження на ґрунт крокуючого екскаватора – драглайна ЕШ-10/50 при роботі становить – $0,96 \text{ кг/см}^2$, при крокуванні – $1,54 \text{ кг/см}^2$. Тоді екскаватор ЕШ-10/50 може працювати без укріплення основи на уступі пісків сарматського ярусу на горизонтах +105,0 м та +110,0 м.

Середня питоме навантаження на ґрунт гідравлічного екскаватора САТ6018 при роботі – $3\text{--}5 \text{ кг/см}^2$. В такому разі екскаватор не може працювати без укріплення основи вибою на уступі пісків сарматського ярусу на горизонтах +105,0 м та +110,0 м.

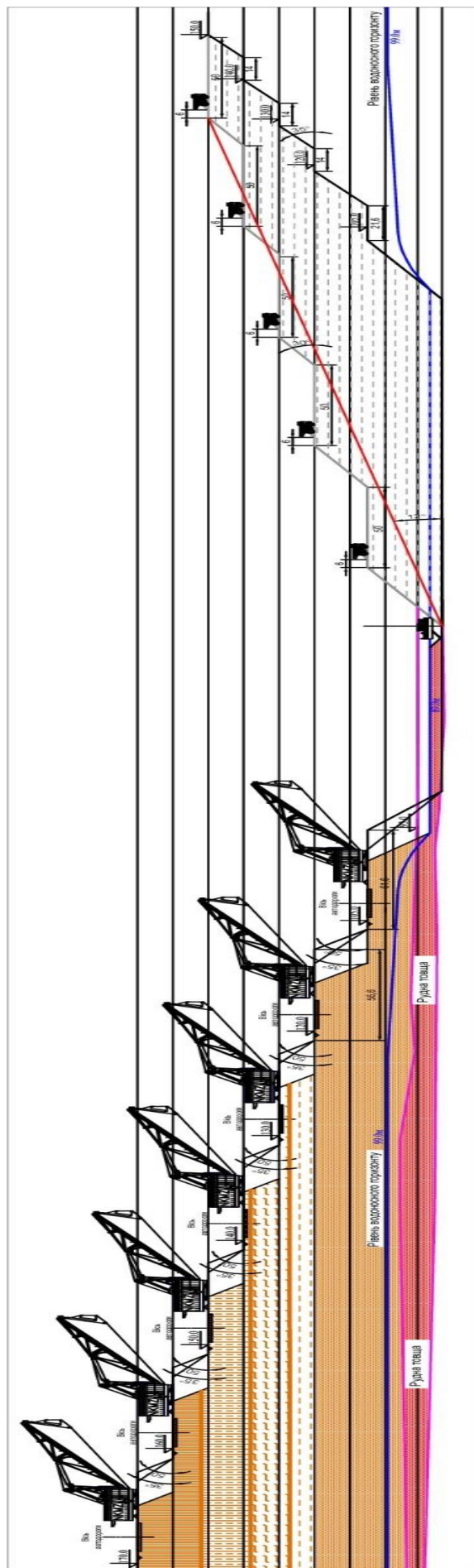


Рис. Параметри елементів системи розробки Мотронівського розсипу

Можна забезпечити роботу екскаватора CAT6018 на уступі пісків сарматського ярусу при умові заміни гусениць ходового візка на ширші, що зменшить питомий тиск на основу вибою.

Середнє питоме навантаження на ґрунт автосамоскида CAT773 при прямо-лінійному русі по тимчасових дорогах з м'якими деформаційними гірськими породами – від 4,5 кг/см² до більше 10 кг/см² при маневрах і розворотах на кривих без зниження швидкості руху. Тому такий автосамоскид не може працювати без укріплення основи дорожнього полотна на уступі пісків сарматського ярусу. При русі в пісках з великим питомим навантаженням на ґрунт збільшується глибина колії, що збільшує опір кочення автосамоскида. Осадка розпушеного сарматського піску має великі значення. Для забезпечення прохідності машини по м'яких ґрунтах питоме навантаження на ґрунт не повинно перевищувати несучу здатність ґрунту.

Для збільшення несучої здатності покриття необхідно влаштування багатопшарової дороги з матеріалів з великим значенням модуля деформації.

Перелік посилань

1. Собко, Б.Ю. (2009). Особливості відкритої розробки розсипних родовищ України. *Науковий вісник НГУ*, 4, 13–16.
2. Собко Б.Ю. (2008). Удосконалення технології відкритої розробки розсипних титанцирконієвих руд. *НГУ*.
3. Гайдін, А.М., Собко, Б.Ю., & Лазніков, О.М. (2016). *Розробка обводнених родовищ титанових руд*. Літограф.
4. Собко, Б.Ю., Ковров, А.С., & Череп, А.Ю. (2017). Геомеханічне обґрунтування параметрів робочої зони кар'єра в умовах підвищеної обводненості. *Зб. наук. праць НГУ*, 51, 64–76.
5. Ковров, О.С., Собко, Б.Ю., Ложніков, О.В., & Лазніков, О.М., Азюковський, О.О., Лотоус, В.В., Назаренко, М.В., & Вінівітін, Д.В., (2020). *Геомеханічна стійкість бортів кар'єрів у складноструктурному гірському масиві*. Журфонд.
6. Ковров, О.С., Собко, Б.Ю., Азюковський, О.О., Ложніков, О.В., Лотоус, В.В., Назаренко, М.В., Вінівітін, Д.В., & Лазніков, О.М. (2020). *Управління зсувонебезпечністю укосів та бортів кар'єрів і відвалів з неоднорідною структурою в мінливих геокліматичних умовах*. Дніпро-VAL.
7. ДБН В.2.1-10-2009. *Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення*. (ДП НДІБК) (2009). Мін регіон буду України.
8. ДСТУ Б В.2.1-2-96. *Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Класифікація*. (1995). Київ.
9. Голярчук, М.Г., Квітка, В.І., & Воробйов, А.І. (2007). *Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин / Частина 1. Гірничі роботи*. СОУ-Н МПП 73.020-078-1:2007. Мінерал.

ABSTRACT

Purpose. Development of a method for selecting mining transport equipment for the development of watered deposits of alluvial titanium-zirconium ores based on the criterion of the bearing capacity of rocks.

The methods. Statistical, analytical, and graph-analytical research methods were used in the work.

Findings. An analysis of the use of mining transport complexes in watered deposits of titanium-zirconium ores with a large capacity of overburden and minerals was conducted. Studies of the

bearing capacity of watered rocks of the Motronivka section of the Malyshevka titanium-zirconium alluvial ore deposit were conducted. The possibility of using cyclic mining and transport equipment (walking excavators ESH 10/50 and hydraulic excavators CAT 6018 for the development of water-saturated rocks in the working horizons of the mine has been determined. Based on the studies performed, for the conditions of the Motronivka placer mine, it was established that the location of mining and transport equipment is not allowed at the horizon + 100.0 m due to the low bearing capacity of the Sarmatian sands at this horizon. The operation of the ESH-10/50 excavator is allowed at the horizons +105.0 m and +110.0 m. At the same time, the operation of the CAT 6018 excavator without replacing the undercarriage with a reduced specific pressure of the excavator on the ground is not allowed when developing the Sarmatian sands at the horizons +105.0 m and +110.0 m; and the use of dump trucks without strengthening the base roadbed on the edge of the Sarmatian sands. The results of the study take into account the features of the development of soft rocks by mining and transport equipment complexes in the conditions of the Motronivskiy MPP mine.

The originality. A methodological approach is proposed to determine the bearing capacity of soils in a mine, taking into account its waterlogged horizons.

Practical implementation. The results of the studies allow us to determine the possibility of using mining and transport equipment in the development of waterlogged rocks in horizontal placer deposits.

Keywords: *rock, bearing capacity of rocks, mineral deposit, open-pit mining system, mining and transport complex, power shovel, dragline excavator.*

дата першого надходження статті до видання	02.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	03.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	05.09.2025